

Des processus de régulation naturelle à l'innovation technique, quelles solutions agro-écologiques pour les agricultures du Sud ?

Éric Malézieux, Bruno Rapidel, François-Régis Goebel, Philippe Tixier

Changement climatique, perte de biodiversité, raréfaction des terres cultivables, diminution des ressources : l'agriculture est confrontée à de nouveaux enjeux à l'échelle mondiale. Dans les pays du Nord, l'augmentation importante de la productivité au cours des 50 dernières années s'est le plus souvent traduite par un recours massif aux énergies fossiles et aux intrants chimiques, entraînant un fort impact négatif sur l'environnement. De plus, l'utilisation importante et continue des pesticides entraîne, outre la dégradation de la qualité des eaux, un impact de plus en plus avéré sur la santé des travailleurs agricoles et des consommateurs.

L'agro-écologie a émergé dans ce contexte, même si son développement reste confronté à de vifs débats sociétaux. Elle est à la fois une discipline scientifique, un mouvement social et un ensemble de pratiques agronomiques (Wezel *et al.*, 2009). Quelle que soit l'acception choisie (la dimension politique reste un point de controverse), la plupart des auteurs s'en réclamant s'accordent sur un certain nombre de principes biologiques qui doivent piloter le fonctionnement des agrosystèmes. L'agro-écologie repose ainsi sur un principe central : l'utilisation des processus naturels, souvent associés à la biodiversité, pour assurer les services écosystémiques, dont la production agricole. Cette importance donnée aux processus naturels conduit à de profondes modifications des systèmes techniques actuels. Ces modifications requièrent aussi un changement radical des objectifs et des modalités de la recherche agronomique dont l'un d'eux consiste, outre la mise au point d'innovations, à accompagner les acteurs dans leurs mutations technologiques.

Ce chapitre a pour objectif d'identifier les connaissances scientifiques sur lesquelles reposent le fonctionnement biophysique des systèmes de culture agro-écologiques innovants qui font ou ont fait l'objet d'appropriations à plus ou moins grande échelle par les agriculteurs, ou qui sont à la base d'innovations initiées par les agriculteurs. Si le mouvement agro-écologique concerne autant les agricultures du Nord que celles du Sud, notre réflexion porte ici plus particulièrement sur les petits agriculteurs du Sud. En effet, la situation de la petite agriculture familiale au Sud reste singulière : elle n'a souvent pas connu la révolution technologique et sa durabilité repose dans de nombreux cas sur les régulations biologiques au sein des agrosystèmes. Ces agricultures peuvent ainsi constituer dans certains cas des exemples que nous tâcherons d'identifier. Préservant la biodiversité et mobilisant les régulations naturelles, certains savoirs locaux ou traditionnels peuvent en effet être à la base de solutions durables pour la protection des cultures et la résilience face au changement climatique.

Dans la plupart des cas, il n'est souvent pas facile de convaincre les producteurs conventionnels d'adopter des pratiques agro-écologiques. En effet, cette nouvelle façon de produire se traduit fréquemment par des modifications importantes des systèmes de culture qui peuvent constituer une prise de risques pour ces producteurs. Il existe par exemple des réticences pour passer d'un système intensif avec recours important aux pesticides à un système de protection intégrée des cultures ou encore d'un système de protection intégrée à une protection agro-écologique des cultures.

Si la connaissance scientifique doit continuer d'être produite et capitalisée, elle n'est pas la seule source d'innovation en agro-écologie. L'innovation repose sur la capacité des acteurs à mobiliser des connaissances issues de diverses sources et surtout à construire ensemble, sur ces bases, de nouvelles connaissances au travers d'échanges formalisés autour des défis, des contraintes et des opportunités pour les producteurs et les sociétés. La place de la recherche dans l'innovation est importante, mais elle doit être repensée dans le nouveau contexte de l'agro-écologie. Les exemples cités dans ce chapitre s'inscrivent dans cette perspective : fournir des éléments de connaissance les plus génériques possibles pour participer à la co-conception de systèmes agro-écologiques innovants qui représentent une alternative durable à l'agriculture conventionnelle.

Les concepts et les principes pour une agriculture agro-écologique

Écosystèmes naturels, agrosystèmes et agro-écologie

Les écosystèmes naturels présentent souvent des caractéristiques communes : un degré élevé de biodiversité, une couverture permanente du sol, la présence d'espèces ligneuses, de nombreuses interfaces entre espèces, etc. À l'opposé, les agrosystèmes intensifs ont systématiquement éliminé ces caractéristiques : diminution drastique de la biodiversité (jusqu'à une seule espèce végétale dans le champ cultivé), travail du sol profond et fréquent, élimination des espèces ligneuses, réduction des interfaces entre les espèces.

Alors que les agrosystèmes sont le plus souvent composés d'un nombre très limité d'espèces cultivées, les écosystèmes naturels sont caractérisés par une importante diversité biologique, qui procure un nombre conséquent de services écosystémiques. La démarche agro-écologique repose ainsi sur une hypothèse centrale : il est possible de produire durablement en s'appuyant sur les fonctionnalités des écosystèmes et en renforçant les régulations biologiques offertes par la biodiversité. La démarche consiste donc principalement à introduire — ou à réintroduire — et à piloter une biodiversité fonctionnelle, cultivée et associée, dans les agrosystèmes intensifs (faisant auparavant un fort usage des intrants chimiques), de manière à tirer profit (en termes de services écosystémiques) de cette introduction ou réintroduction. Cette démarche peut être mise en œuvre à plusieurs échelles, de la parcelle au paysage. La pratique prouve que l'introduction de la biodiversité a bien d'importantes répercussions sur le fonctionnement de l'agrosystème (Malézieux, 2012). Selon les espèces et modalités d'implantation choisies, elle permet précisément :

- d'utiliser la complémentarité des traits fonctionnels entre les différentes espèces pour une meilleure utilisation des ressources et donc d'augmenter la productivité totale de l'écosystème cultivé ;
- d'assurer la pérennité de la présence d'une couverture du sol, voire d'une couverture arborée ;
- d'augmenter l'hétérogénéité, et donc les interfaces dans le système ;
- de mobiliser les régulations naturelles des bioagresseurs au sein des

réseaux trophiques ;

– d'utiliser les propriétés des plantes pour le contrôle des bioagresseurs (substances naturelles attractives vs répulsives).

L'incorporation d'une plus grande diversité végétale dans l'espace et dans le temps entraîne également l'augmentation de la teneur en matière organique et l'amélioration du fonctionnement biologique des sols. Ainsi, le mélange d'espèces végétales est au centre de la conception de systèmes de culture agro-écologiques (Malézieux *et al.*, 2009). La gestion de la biodiversité n'est cependant pas une solution simple à mettre en œuvre. En effet, seuls des assemblages d'espèces appropriés, accompagnés d'une gestion favorisant l'ensemble des mécanismes de régulation, permettent de procurer ces propriétés et d'augmenter la production, débouchant *in fine* sur une durabilité accrue des agrosystèmes. Nous avons tenté de synthétiser dans la figure 11.1 l'ensemble des relations entre les objectifs, les processus et les innovations dans les systèmes agro-écologiques.

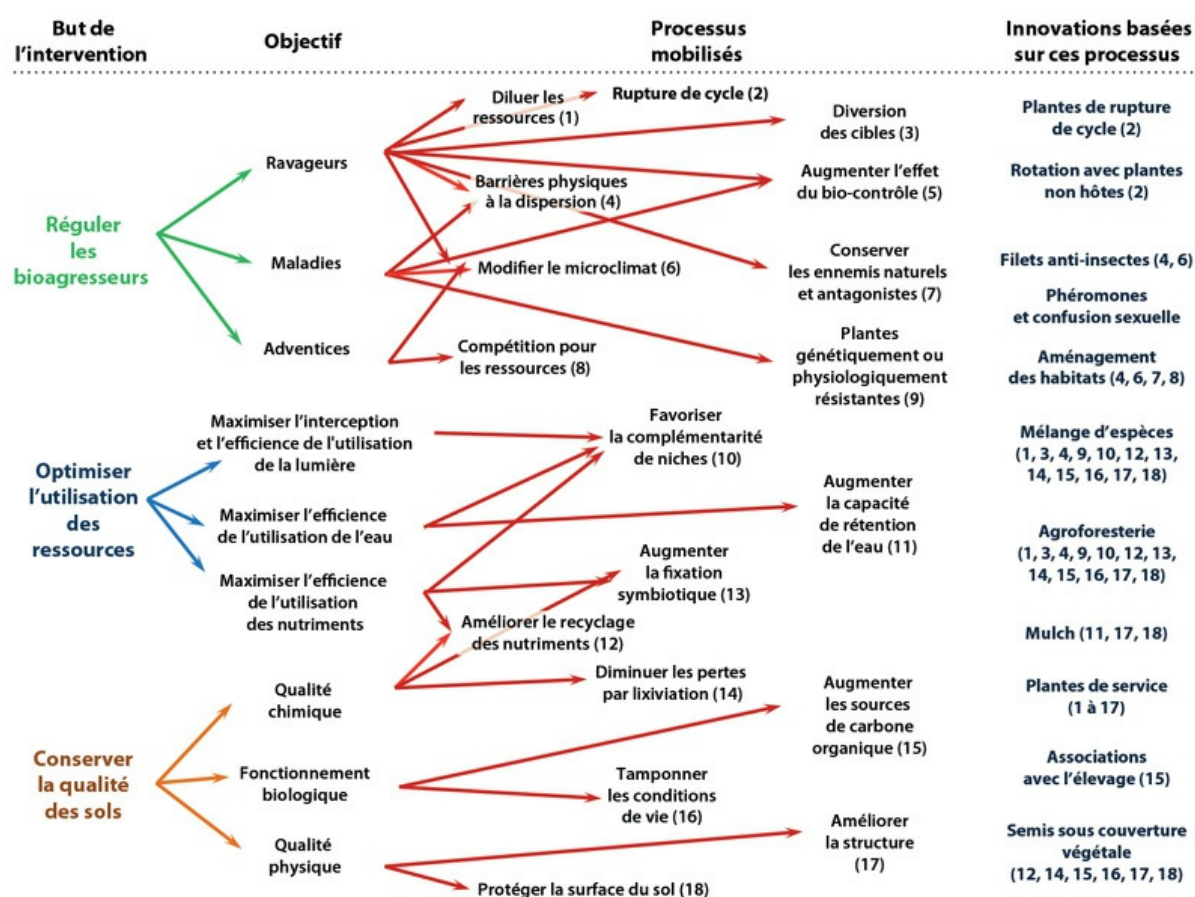


Figure 11.1. Concepts et processus mobilisés en agro-écologie dans le but de réduire l'utilisation d'intrants chimiques (d'après Ratnadass *et al.*, 2012 ; Husson *et al.*, 2015).

La mobilisation des concepts de l'écologie

Comme son étymologie le rappelle, l'agro-écologie mobilise des concepts issus de deux disciplines : l'agronomie et l'écologie. Les concepts de niche écologique, de dispersion des espèces, d'interaction biologique, de dynamique des communautés, d'interactions multi-trophiques, de redondance et de complémentarité fonctionnelle sont par exemple essentiels pour la création de systèmes agro-écologiques. Ces concepts issus de l'écologie permettent de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes naturels : leur application dans le domaine de l'agriculture constitue l'un des enjeux scientifiques de l'agro-écologie. Des exemples illustrent comment ces notions peuvent être mobilisées pour concevoir des agrosystèmes plus durables. La complémentarité fonctionnelle est par exemple un élément essentiel d'une association d'espèces : l'association de deux espèces repose sur le principe que des individus d'une espèce seront moins en compétition avec des individus d'une autre espèce qu'avec des individus de leur propre espèce. En écologie, la capacité des plantes à remplir les fonctions nécessaires à la survie de l'écosystème est représentée par des traits fonctionnels. Cette approche a également été utilisée récemment en agronomie pour étudier certaines associations de cultures (Damour *et al.*, 2018). La complémentarité fonctionnelle au niveau aérien permet d'orienter voire d'optimiser l'utilisation et la restitution des ressources (voir encadré 11.1). La complémentarité fonctionnelle a également été mobilisée en ce qui concerne les systèmes racinaires, de manière à favoriser des explorations de niches différentes par des espèces ayant des stratégies opposées d'acquisition, de conservation et d'utilisation des ressources (Weemstra *et al.*, 2016).

Encadré 11.1. L'association des caféiers et de l'érythrine

B. Rapidel

L'association communément pratiquée entre caféier et érythrine (*Erythrina* spp.) représente un bon exemple de la complémentarité fonctionnelle entre espèces : l'érythrine a une stratégie de croissance rapide, de faibles réserves et induit une décomposition de litière très rapide, tandis que le caféier a un tout autre comportement (du *Leaf Economic Spectrum* ou « spectre économique foliaire ») (Wright *et al.*, 2004), avec un bois dense et résistant à la décomposition, et une faible surface foliaire spécifique (SLA) (photo 11.1). En outre, la production de café dépend fortement de la disponibilité de l'azote, et l'érythrine est une légumineuse fixatrice d'azote. Le caféier,

arbuste de sous-bois, est adapté à des ambiances de pénombre. Les racines des deux espèces montrent également des traits différents (croissance lente et forte densité d'exploration pour le caféier, croissance rapide pour l'érythrine et exploration d'une grande surface), mais elles explorent des niches relativement similaires. Ainsi, ces espèces peuvent rentrer en compétition pour l'eau, mais l'érythrine étant beaucoup moins résistante à la sécheresse que le caféier, elle ne peut pas survivre dans des environnements où la disponibilité d'eau pourrait devenir limitante pour le caféier.



Photo 11.1. L'association caféier-érythrine. © Bruno Rapidel / Cirad.

La diversité végétale et la régulation des bioagresseurs

En intégrant de nouvelles espèces végétales dans l'agrosystème, il est possible de réduire l'impact des insectes ravageurs et des maladies à travers plusieurs voies, qui peuvent éventuellement se combiner (fig. 11.1 et numéros associés) :

- en utilisant la dilution des ressources et les phénomènes de diversion chez les insectes, basés sur des effets visuels et olfactifs des plantes (1 et

3) ;

- en perturbant le cycle du bioagresseur dans l'espace *via* des effets non hôtes (2 et 3) ;
- en encourageant des effets allélopathiques dynamiques dans le sol ;
- en stimulant des antagonistes spécifiques aux ravageurs et maladies présents dans le sol ;
- en augmentant la résistance physiologique de la plante par un apport optimisé de nutriments dans le système de culture ;
- en stimulant les effets de contrôle par prédation des ravageurs des plantes, en conservant leurs ennemis naturels (7) ;
- en modifiant l'architecture des plantes pour produire des barrières physiques et un microclimat défavorables à ces bioagresseurs (4 et 6).

La lutte « par conservation » a pour objectif de favoriser la présence d'ennemis naturels (7). Elle implique de prendre en compte les interactions entre les insectes et leurs habitats naturels ou cultivés, afin d'organiser ensuite ces habitats pour augmenter l'efficacité du contrôle biologique. Ces nouvelles pratiques visent souvent à optimiser la conservation des ennemis naturels dans un espace donné incluant la parcelle de culture (encadré 11.2 ; Landis *et al.*, 2000 ; Nicholls et Altieri, 2004). Cela suppose de connaître tous les éléments-clés du paysage entourant la parcelle agricole ou l'exploitation : la végétation naturelle, sa localisation, ses caractéristiques, sa taille et les espèces de plantes qui sont présentes, les jachères, les haies, les bosquets, etc. Cette approche peut très bien être combinée avec la lutte « biologique traditionnelle par augmentation ou acclimatation », qui favorise l'implantation artificielle d'ennemis naturels (comme les parasitoïdes) dans l'agrosystème visé.

Encadré 11.2. Les processus *push-pull* en culture de canne à sucre

F.-R. Goebel

Des recherches ont identifié les plantes de service à utiliser ou à introduire en bordure des champs de canne à sucre pour stimuler la régulation naturelle du foreur des tiges *Eldana saccharina* en Afrique du Sud : des plantes sauvages comme *Cyperus*, *Erianthus*, *Pennisetum* ou *Desmodium*, et des plantes cultivées comme le maïs ou le sorgho, jouent le rôle de plantes attractives aux parasitoïdes ou répulsives aux bioagresseurs (Conlong et Rutherford, 2009 ; Cockburn *et al.*, 2014). L'objectif est d'augmenter la régulation naturelle des bioagresseurs en enrichissant la biodiversité dans des systèmes de culture de canne à sucre souvent intensifs et qui ont détruit ces modes de régulation

(fig. 11.2).

À la Réunion, une plante proche de la canne à sucre, *Erianthus*, a été testée et utilisée comme plante piège en bordure du champ de canne à sucre pour attirer et tuer le lépidoptère foreur *Chilo sacchariphagus*, cette plante étant plus attractive que la canne (Nibouche *et al.*, 2012). Cette action peut-être combinée à des lâchers de parasitoïdes complémentaires, tels que les trichogrammes, pour éliminer les pontes de ce foreur en bordure des champs de canne. Ces plantes de service peuvent donc être utilisées pour mettre au point un système *push-pull* (attraction-répulsion) qui agit comme une composante intéressante de la protection agro-écologique des cultures (Goebel *et al.*, 2018).

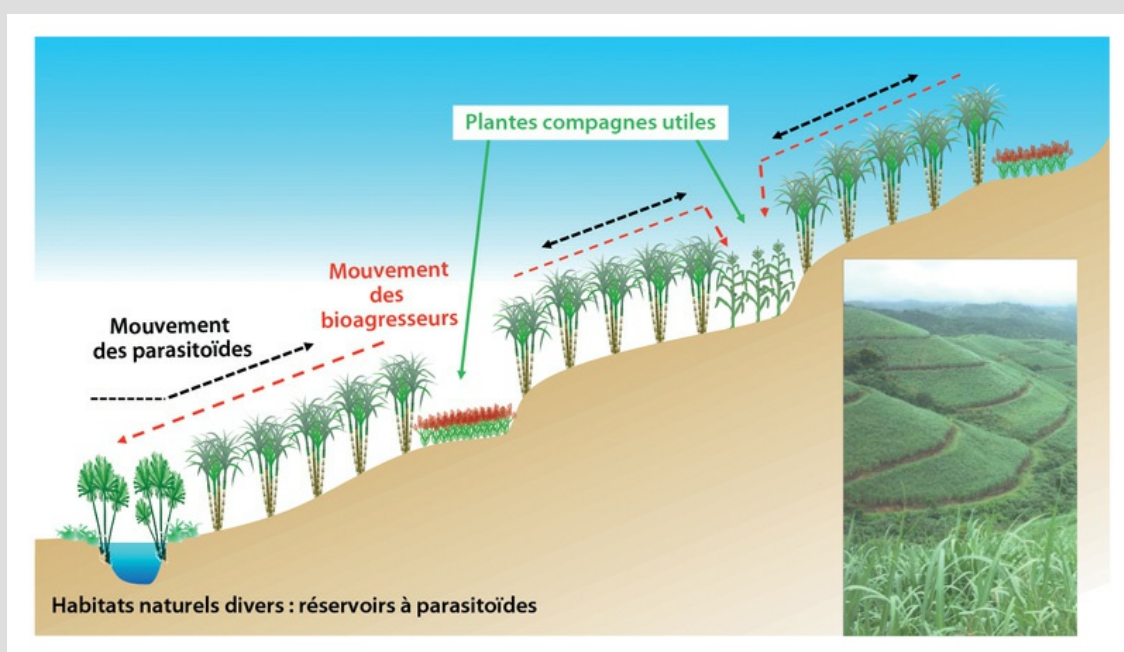


Figure 11.2. Utiliser les éléments du paysage et introduire des plantes de service pour le contrôle biologique des bioagresseurs (cas d'*Eldana saccharina*, ravageur de la canne à sucre en Afrique du Sud ; Conlong et Rutherford, 2010).

La gestion des bioagresseurs est construite sur une connaissance large et approfondie des interactions dans l'agroécosystème entre les insectes et leurs ennemis naturels (parasitoïdes, pathogènes, prédateurs...), les plantes hôtes et la végétation naturelle qui les abrite.

La modification des cycles biogéochimiques

L'introduction de biodiversité dans un agrosystème affecte également les cycles biogéochimiques : les cycles de l'eau et du carbone peuvent être

profondément modifiés (fig. 11.1), en particulier par l'introduction d'espèces ligneuses comme le montre l'exemple de l'agroforesterie en Afrique soudano-sahélienne (encadré 11.3).

Encadré 11.3. L'agroforesterie en Afrique soudano-sahélienne

B. Rapidel

Il existe de nombreux exemples d'agroforesterie en Afrique sahélienne et soudano-sahélienne. Pour expliquer la coexistence entre arbres et cultures, il est toutefois souvent difficile de distinguer les raisons biologiques des raisons socio-économiques. Deux exemples ont cependant des fondements biologiques largement explorés : le premier est l'association entre les cultures et l'arbre *Faidherbia albida*, une légumineuse. Cet arbre a la particularité de perdre ses feuilles en saison des pluies, contribuant ainsi à maintenir un niveau élevé de matière organique dans le sol (cas de tous les arbres dans les cultures) tout en n'entrant pas en compétition pour la lumière et l'eau avec les cultures de saison des pluies. Son système racinaire à croissance rapide permet à cette espèce d'atteindre la nappe phréatique dès les premières années de croissance, et de maintenir ainsi ses feuilles en saison sèche (Roupsard *et al.*, 1999). Coupées en fonction de la demande, ces feuilles fournissent un complément d'alimentation du bétail. Cette espèce a été largement utilisée dans des programmes de reforestation au Niger (Garrity *et al.*, 2010). Un autre exemple est celui des arbustes des zones sèches *Guiera senegalensis* (Combrétacées) et *Piliostigma reticulatum* (Fabacées), maintenus en zone sahélienne dans les champs de sorgho et de mil. Ces arbustes ont des racines profondes et maintiennent leur feuillage en saison sèche en réussissant à capter des ressources en eau inaccessibles aux céréales annuelles auxquelles ils sont associés (Louppe, 1991). Des recherches ont mis en évidence un approvisionnement en eau des horizons superficiels depuis les horizons profonds plus humides au travers de leur système racinaire (Kizito *et al.*, 2012). Ils supportent une taille annuelle presque totale. Ils sont fréquemment cités comme espèces de restauration des sols dégradés, car ils permettent une accumulation de matière organique (Diack *et al.*, 2000).

Des principes écologiques à l'innovation

À l'échelle de la parcelle et du système de culture, les principes de l'agro-écologie doivent se traduire en réalisations concrètes, mises en œuvre par des acteurs : quelles espèces combiner ? Quels modes de conduite mettre en œuvre ? L'agronome doit faire face à de nouvelles questions : comment

concevoir ces nouveaux systèmes plus complexes ? Comment les évaluer ? Sur quels critères ?

On passe ainsi des principes de l'agro-écologie à des innovations basées sur des modalités d'action. Le principe d'introduction de biodiversité dans un agrosystème peut comprendre différentes modalités d'action stimulant les processus agro-écologiques identifiés (voir fig. 11.1). Celles-ci passent essentiellement par le mélange d'organismes (Malézieux *et al.*, 2009) : on peut mélanger des variétés, des espèces végétales productives, introduire des plantes de service, mélanger des espèces non ligneuses et ligneuses, des espèces végétales et animales (voir fig. 11.2). Chacune de ces pratiques met en œuvre plusieurs processus. Si les combinaisons théoriques sont très nombreuses, la recherche de systèmes efficaces est plus difficile, et celles qui correspondent aux conditions d'acceptabilité des producteurs sont en nombre encore beaucoup plus limité. Au-delà de la dimension spatiale, la dimension temporelle est essentielle : les rotations, associant ou pas des espèces de couverture, constituent une modalité d'action essentielle de l'agro-écologie. Le pas de temps peut être très variable : à la temporalité courte de l'association d'espèces légumières dont le cycle n'est que de quelques mois, on associe la temporalité longue des espèces ligneuses sur plusieurs dizaines d'années. Ces deux temporalités peuvent parfaitement s'interpénétrer : l'agriculteur doit gérer les deux pas de temps, parfois sur la même parcelle. On peut ainsi établir une typologie des systèmes de culture basée sur une complexification croissante des systèmes et l'introduction d'espèces ligneuses.

Dans ce qui suit, nous illustrerons ces différentes modalités d'introduction de la biodiversité à travers quatre cas d'étude successifs : les plantes de service en monocultures, les systèmes sous couverture végétale, l'association de deux espèces ligneuses et les systèmes complexes en zone tropicale humide.

Un exemple central en agro-écologie : les plantes de service et la gestion des enherbements

La diversité des communautés présentes dans les agrosystèmes est susceptible de favoriser la fourniture de multiples services écosystémiques. Le contrôle des plantes adventices (plantes provoquant des pertes de rendement par compétition avec la plante cultivée) est par exemple

directement en lien avec la biodiversité végétale présente sur les parcelles. L'introduction d'une plante de service est ainsi un moyen de modifier la composition de la communauté végétale afin de favoriser ce service. Dans notre exemple sur le contrôle des adventices, le choix de l'espèce est complexe car cela peut générer des compétitions avec la culture principale. Les plantes de service doivent donc satisfaire un ensemble des caractéristiques dont certaines peuvent être antagonistes (fig. 11.3).

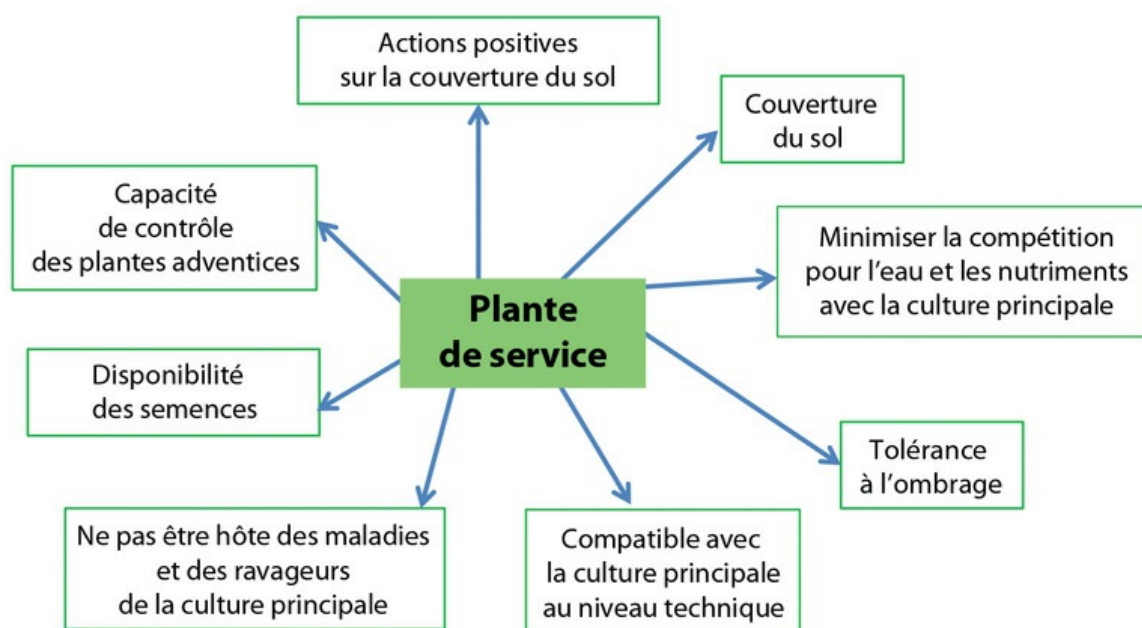


Figure 11.3. Ensemble des services devant être satisfaits par les plantes de service.

D'une manière générale, les plantes de service sont susceptibles de fournir de multiples services écosystémiques *via* les modifications physiques (structure physique et chimique du sol) et biologiques du milieu qu'elles engendrent (voir fig. 11.1). Elles sont ainsi par exemple de plus en plus employées dans divers systèmes de culture comme les bananeraies et les vergers pour lutter contre les adventices, et *in fine* limiter l'utilisation des herbicides (encadrés 11.4 et 11.5). Au-delà de cet objectif, l'ajout d'une plante de couverture modifie le fonctionnement global du système tant au niveau des cycles de l'eau et des nutriments (Tixier *et al.*, 2011), que des interactions entre les communautés d'insectes et de micro-organismes (Duyck *et al.*, 2009). L'ajout d'une nouvelle ressource dans le système est un levier très fort pour modifier les réseaux trophiques. Que ce soit dans le compartiment aérien ou souterrain, cette nouvelle ressource peut participer à l'augmentation de l'abondance des herbivores et ainsi favoriser celle des

prédateurs généralistes qui ensuite sont susceptibles d'exercer aussi une meilleure régulation des ravageurs.

Encadré 11.4. Les plantes de service en bananeraies

P. Tixier

Les plantes de service ont été largement utilisées dans les systèmes de culture bananiers des Antilles françaises, soit en période d'interculture, soit en association avec les bananiers. Ces deux possibilités reposent sur des plantes ayant des caractéristiques potentiellement différentes. En période d'interculture (jachère enherbée), en plus d'une très bonne capacité à couvrir le sol et à contrôler les plantes adventices, une plante de service adaptée aux jachères doit :

- ne pas être hôte des nématodes phytoparasites des bananiers (*Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae*) afin que la jachère joue son rôle de « vide sanitaire » ;
- améliorer la structure physique du sol (travail du sol biologique) ;
- être compatible avec la replantation des bananiers en fin de jachère et assurer des restitutions de nutriments après la plantation des bananiers.

Les caractéristiques des plantes de service associées au bananier doivent se situer dans la gamme étroite permettant le bon contrôle des plantes adventices sans provoquer de compétition pour les ressources avec les bananiers. Elles doivent également avoir suffisamment de plasticité pour s'adapter aux variations de la ressource lumineuse disponible au cours des cycles de production (fermeture de la canopée en premier cycle, réouverture après les récoltes). Une méthode pour sélectionner des plantes de service est basée sur la description de traits fonctionnels des espèces candidates comme évaluateurs (facilement mesurables) des services qu'elles sont susceptibles de fournir (Damour *et al.*, 2014). La mise en œuvre de cette approche a nécessité la caractérisation en collection d'un grand nombre d'espèces puis le test des plus prometteuses dans des prototypes de systèmes de culture. Ces étapes permettent de valider la sélection en prenant en compte les contraintes techniques et d'opérer les ajustements de gestion du couvert.

L'ajout d'une plante de couverture permet également de maintenir un réseau trophique plus abondant (prédateurs et omnivores) (Djigal *et al.*, 2012). Cependant, l'effet sur la régulation des bioagresseurs dépend souvent de l'espèce de la plante de couverture. Ainsi, les plantes de la famille des Poacées semblent plus favorables à la régulation des nématodes phytoparasites que celles de la famille des légumineuses. De manière similaire dans le compartiment aérien, les prédateurs généralistes (notamment la fourmi *Solenopsis geminata*) sont plus abondants dans les parcelles avec

une plante de couverture (*Brachiaria decumbens*) que dans les parcelles au sol nu (Mollot *et al.*, 2012).

Encadré 11.5. La gestion des enherbements spontanés en vergers

F. Le Bellec

Les agrumes sont souvent sujets à des attaques de divers bioagresseurs compromettant la qualité des récoltes et la vie des arbres pour certaines maladies. Les acariens phytophages et certains insectes (comme les thrips) occasionnent sur les fruits des dégâts irréversibles lorsque leurs populations sont importantes. Pour limiter ces dégâts, les producteurs appliquent de nombreux traitements phytosanitaires préventifs. Or les acariens de la famille des Phytoséiidés peuvent contribuer à réguler les populations d'acariens phytophages et des thrips. Cependant, la protection phytosanitaire vis-à-vis des premiers impacte nécessairement les seconds. Par la gestion raisonnée dans le temps et dans l'espace des enherbements spontanés des vergers d'agrumes, il est possible de promouvoir un habitat propice aux populations des Phytoséiidés dans les vergers (photo 11.2).

Des études ont ainsi été menées dans des vergers de producteurs de l'île de la Réunion (Rothé *et al.*, 2016 ; Simon *et al.*, 2017). La diversité floristique contenue dans les enherbements de ces vergers — quel que soit le mode de gestion de l'enherbement — assurait une abondance de traits fonctionnels synonymes d'habitats et de nourriture pour les prédateurs généralistes (coccinelles et Phytoséiidés). Treize espèces de Phytoséiidés ont ainsi été répertoriées dans les enherbements de ces vergers.

Le maintien d'un habitat peu perturbé au sein d'un verger permet donc potentiellement d'augmenter l'efficacité de la lutte biologique et de diminuer l'usage des pesticides. Mais comment augmenter la biodiversité fonctionnelle au sein de ces vergers pour assurer efficacement le service écosystémique de régulation des bioagresseurs ? L'étude des traits fonctionnels des espèces végétales de la flore spontanée a permis de prédire la composition des différents enherbements en réponse aux différents modes de gestion et donc de supprimer ou de favoriser certaines espèces végétales de ces communautés. Toutefois, pour garantir en permanence le service écosystémique de régulation des ravageurs, les tactiques de gestion doivent créer des habitats refuges de transition pour les auxiliaires. Cela implique de différencier dans le temps et dans l'espace des interventions de gestion des enherbements. Ces techniques sont donc complexes et nécessitent à la fois une bonne connaissance des processus et des techniques mises en œuvre.



Photo 11.2. La gestion des enherbements en vergers d'agrumes.
© Fabrice Le Bellec / Cirad.

L'utilisation de plantes de service existe également pour les cultures annuelles. L'association d'espèces annuelles comprend de nombreuses techniques dont les systèmes sous couverture végétale. Le semis direct

sous couvert végétal, pratique liée à l'agriculture de conservation, vise à maintenir une couverture végétale permanente, et à limiter le travail du sol à la ligne de semis. Cette pratique réduit ainsi l'érosion et renforce l'activité biologique du sol, contribuant à la gestion durable de la matière organique du sol. La technique de semis direct sous couvert végétal s'est répandue dans de nombreuses situations tropicales (Afrique, Amérique du Sud, Asie du Sud-Est notamment) mais aussi en France. En riziculture à Madagascar, les premiers essais de semis direct sous couverture végétale datent du début des années 1990. Ces couvertures ou *mulch* présentent plusieurs intérêts à la plantation du riz pluvial : elles procurent une importante matière organique, limitent l'évaporation directe du sol, diminuent les amplitudes thermiques à la surface du sol, et ont un effet net sur les adventices, ce qui augmente le rendement à la fin du cycle (Husson, 2013 ; Ranaivoson *et al.*, 2017). À titre d'exemple, le succès de la légumineuse pérenne *Stylosanthes guianensis* (Fabacée), comme plante de couverture produisant une forte biomasse et possédant des effets allélopathiques sur des bioagresseurs du sol comme les vers blancs voire aussi certains nématodes, a été démontré (Husson *et al.*, 2013 ; Husson *et al.*, 2015).

Dans le bassin cotonnier du Cameroun, le semis sous couvert végétal basé sur une rotation biennale céréale-cotonnier a été proposé après quatre années d'expérimentations concluantes (Naudin *et al.*, 2010). En première année, la céréale (sorgho ou maïs) est associée à une plante de couverture qui peut être une graminée (*Brachiaria ruziziensis*) ou une légumineuse (*Crotalaria retusa*). L'objectif est de maintenir le rendement de la céréale, base de l'alimentation familiale, tout en produisant suffisamment de biomasse pour couvrir le sol après la récolte. L'année suivante, le cotonnier est semé manuellement dans cette couverture végétale morte. Ce système a été adopté par les agriculteurs et vulgarisé par les organismes de développement.

Les systèmes agroforestiers

Les systèmes agroforestiers sont des systèmes cultivés qui associent plusieurs strates (au minimum une strate arborée à une strate herbacée), et qui incorporent une diversité spécifique souvent élevée. Entre champ cultivé et forêt (*ager* et *sylva*), les systèmes agroforestiers combinent espèces annuelles et pérennes, herbacées et ligneuses, selon un ensemble

de pratiques plus ou moins complexes. Les systèmes agroforestiers ne sont pas une spécificité tropicale : ils étaient très répandus dans les zones tempérées et méditerranéennes avant l'introduction de la mécanisation et connaissent un nouvel essor aujourd'hui. Dans les zones tropicales, ils sont très présents dans de très nombreuses petites exploitations familiales. Ils font l'objet d'un intérêt croissant de la communauté scientifique internationale.

L'association de deux espèces ligneuses

Les exemples les plus répandus d'agroforesterie dans le monde sont en fait représentés par les associations de plantes pérennes, c'est-à-dire la plantation de cultures pérennes (en particulier cacaoyers, caféiers, hévéas, cocotiers) en association avec d'autres espèces pérennes. Selon le cas, il peut s'agir d'arbres d'ombrage venant de forêts éclaircies — on parle alors d'agroforêts — ou de plantations spécifiques d'arbres d'ombrage, au moment de la plantation de la culture pérenne ou un peu avant. La diversité spécifique de l'ombrage est généralement plus faible dans le cas de plantations sur terrains nus.

On trouve également des associations entre deux cultures pérennes. Ces associations sont expliquées par la tolérance à l'ombrage de certaines d'entre elles, comme le caféier ou le cacaoyer, originaires des sous-bois. Dans d'autres cas toutefois, ces associations sont motivées par le délai entre la plantation de la culture pérenne et son entrée en production, et par le temps requis par certaines cultures pour occuper l'espace de la plantation. Ainsi, on trouve des plantations de caféiers qui entrent en production trois ans après la plantation, et dans les inter-rangs de l'hévéa qui produit six à sept ans après sa plantation. Dans la plupart des cas, l'agroforesterie permet la fourniture de nombreux services écosystémiques (encadré 11.6).

Encadré 11.6. L'agroforesterie à base de caféier et la fourniture de services écosystémiques

B. Rapidel

L'association de caféiers avec des arbres permet de fournir des services écosystémiques à l'agriculteur et à la société, ces derniers n'étant généralement pas comptabilisés (Rapidel *et al.*, 2011) (fig. 11.4 et photo

11.3). En suivant la classification proposée par le *Millennium Ecosystem Assessment* (2005), on peut citer les différents services fournis par des plantations en Amérique centrale.

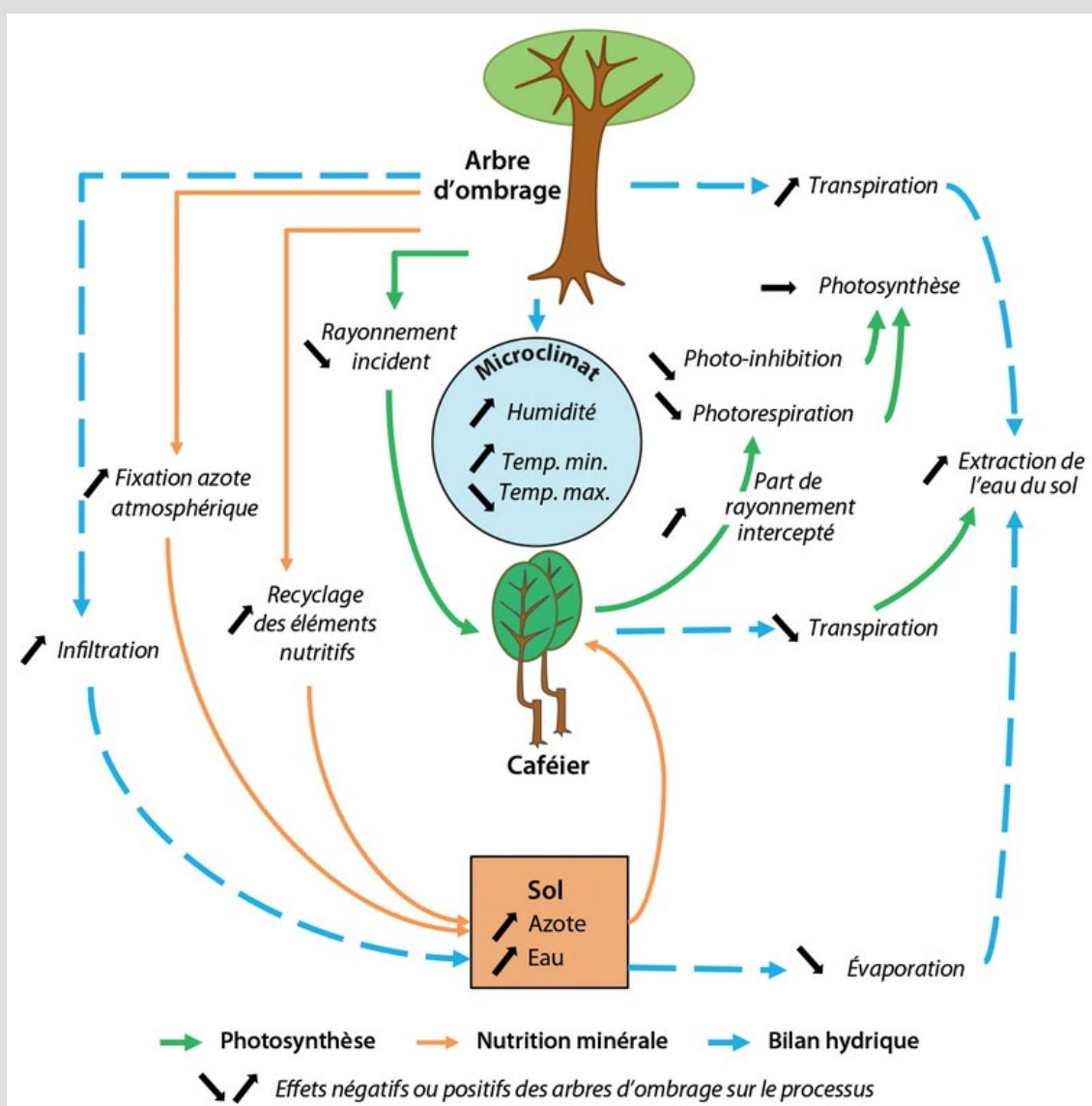


Figure 11.4. Effets des arbres d'ombrage sur la photosynthèse, le bilan hydrique et la nutrition minérale du caféier (Rapidel *et al.*, 2015).

Les services d'approvisionnement

On a montré que des plantations caféières agroforestières simplifiées produisent par exemple des bananes, permettant une diète de meilleure qualité (Meylan *et al.*, 2013). Dans des systèmes plus divers, les nombreux produits représentent des sources de revenu additionnel appréciables ; ces systèmes, à couverture du sol permanente, qui protègent la surface du sol avec des résidus en décomposition fournissent aussi de l'eau de meilleure qualité, moins chargée en sédiments, pour les barrages en aval.

Les services de régulation

Ces plantations procurent une régulation climatique, avec des bilans de gaz à effet de serre plus favorables du fait d'une moindre utilisation de fertilisants synthétiques (Hergoualc'h *et al.*, 2012) ; une régulation des bioagresseurs, par exemple par les oiseaux pour le scolyte du caféier, mais plus généralement par l'enrichissement des réseaux trophiques aériens et souterrains. Ces régulations dépendent toutefois des bioagresseurs considérés, certaines maladies fongiques en particulier pouvant être favorisées par les conditions microclimatiques à l'ombre des arbres.

Les services de support

Dans ces plantations, le recyclage des éléments nutritifs est amélioré (ce qui a été abondamment prouvé), mais aussi la fixation symbiotique de l'azote (Meylan *et al.*, 2017), ainsi que la conservation de la fertilité du sol.

Enfin, l'effet positif des systèmes agroforestiers sur la conservation de la biodiversité des plantes et des animaux a également été clairement prouvé à de nombreuses reprises (DeClerck *et al.*, 2010). Il est relativement clair que ces systèmes sont préférables aux plantations en plein soleil pour les sociétés, en particulier lorsque ces capacités à fournir des services sont combinées dans des exercices de co-conception de systèmes agroforestiers avec les producteurs (Meylan, 2012). Ces services devraient donc procurer aux producteurs des revenus supérieurs. Ce n'est toutefois pas toujours le cas, en particulier quand le seul produit commercialisé est le café, dont la production, selon les cas, peut être inférieure en système agroforestier.



Photo 11.3. Caféiers sous ombrage. © Bruno Rapidel / Cirad.

Les systèmes agroforestiers complexes en zone tropicale humide

Conçus sur le modèle de la forêt tropicale à plusieurs strates, les systèmes agroforestiers en zone tropicale humide et subhumide assurent à la fois la subsistance des populations locales et d'importantes fonctions environnementales et socio-économiques. Caractérisés par une diversité biologique planifiée élevée (l'agriculteur gère de manière planifiée un nombre important d'espèces végétales), une forte hétérogénéité structurelle du système, une évolution significative de la structure de la végétation sur un pas de temps long, la fourniture de nombreux services écosystémiques, les systèmes agroforestiers en zone humide offrent un exemple marquant de durabilité reposant sur le rôle de la biodiversité (encadré 11.7).

Encadré 11.7. Les systèmes agroforestiers humides

É. Malézieux

En Amérique centrale, en Asie, en Afrique, certaines plantations agroforestières de caféiers ou de cacaoyers reproduisent la structure des forêts naturelles et ont des indices de biodiversité souvent comparables aux forêts protégées, représentant ainsi une valeur importante en matière de conservation (Deheuvels *et al.*, 2012) (photo 11.4). Une diversité élevée de plantes cultivées ou spontanées sert de refuge et d'habitat à de nombreuses espèces végétales et animales, jouant ainsi un rôle déterminant dans le maintien de la biodiversité patrimoniale dans des zones sensibles. Au plan social, la multiplicité des sources de revenus ou de services (bois, pharmacopée, cueillette, chasse, protection climatique, limitation des pertes en nitrate, paysage, protection contre l'incendie, etc.) offertes par les systèmes agroforestiers constitue souvent un facteur de stabilité important, comme le montre l'exemple des cacaoyères au Cameroun (Jagoret *et al.*, 2014 et chap. 3). Cela permet de compenser l'instabilité des cours des produits agricoles (cas des produits tropicaux comme le café ou le coprah).



Photo 11.4. Parcelle agroforestière, Cameroun. © Éric Malézieux / Cirad.

Comment relier les principes de l'agro-écologie

à l'action ?

L'agro-écologie puise ses principes dans l'analyse du fonctionnement des écosystèmes naturels. Au-delà de la parcelle, la mise en œuvre de ces principes dans les agrosystèmes nécessite l'appréhension de plusieurs niveaux d'organisation. Ainsi, c'est d'abord au niveau de l'exploitation agricole que doit s'inscrire la démarche agro-écologique (choix des espèces, interactions animal-végétal, positionnement des cultures dans le terroir de l'exploitation et dans l'organisation temporelle des travaux agricoles, maintien d'îlots de biodiversité, etc.). Plus largement, l'échelle du bassin versant doit également être considérée, comme celle du paysage (au sens de *landscape ecology*) pour, en particulier, prendre en compte les régulations propres aux interactions territoriales et aux habitats des différentes espèces de bioagresseurs et auxiliaires. Mais la démarche agro-écologique doit également s'intégrer dans les systèmes sociaux, plus ou moins territorialisés, que constituent les filières et, plus largement, dans les systèmes alimentaires (fig. 11.5).

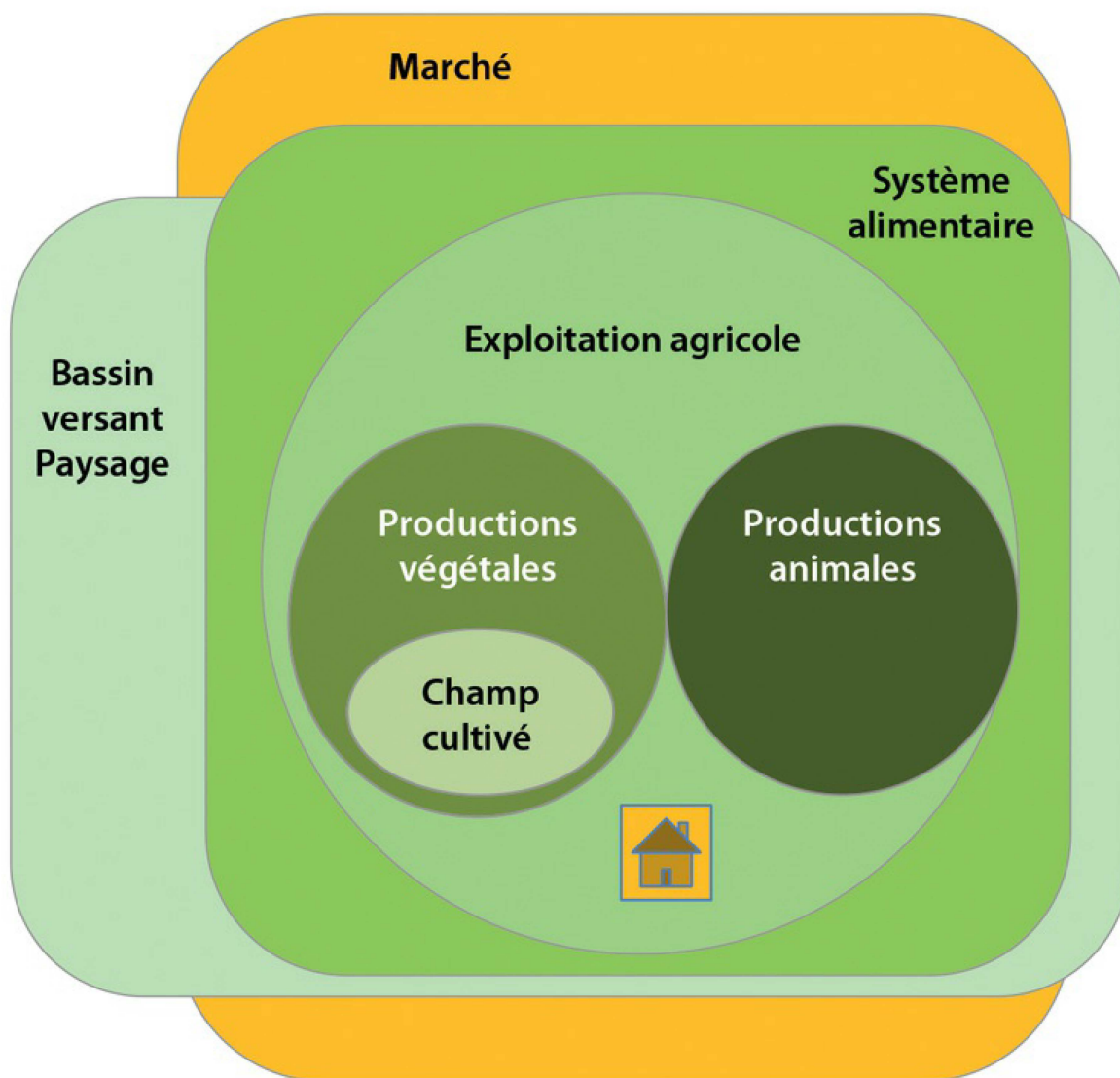


Figure 11.5. Les différentes échelles d'intégration (d'après Griffon, 2013).

La démarche agro-écologique pose également la question du processus d'innovation. Il existe un chemin important, qui peut être long et sinueux, entre d'une part la création des connaissances scientifiques sur le fonctionnement des écosystèmes et d'autre part leur utilisation dans la conception d'un système agricole durable, mis en œuvre par des agriculteurs. Autrement dit, il existe de nombreuses étapes entre la formalisation des principes qui serviraient de base à une agriculture considérée comme « agro-écologique » et leur traduction dans des systèmes techniques réels observables à grande échelle. Dans le domaine de l'agro-écologie, l'innovation exige souvent l'appropriation durable et la mobilisation par les agriculteurs de connaissances à la fois scientifiques et locales sur des processus parfois complexes. Elle nécessite également des


boucles d'interaction entre des chercheurs, des acteurs du développement et des agriculteurs. Plusieurs démarches ont tenté de formaliser ces processus d'innovation entre les acteurs. Citons à titre d'exemple les démarches entreprises en verger (Le Bellec *et al.*, 2012) ou la démarche DATE (*Diagnosis, Design, Assessment, Training and Extension*) qui permet de co-concevoir des systèmes de culture innovants en agriculture de conservation, mais aussi d'effectuer des évaluations multicritères (Husson *et al.*, 2015) : cette démarche multi-échelles associe plusieurs partenaires et c'est une approche participative intégrant la connaissance scientifique et les savoirs locaux. D'une manière générale, la mise en œuvre du paradigme de l'agro-écologie requiert que la recherche intègre ces éléments nouveaux et puisse les mettre en œuvre dans un contexte élargi aux acteurs du développement et de la société civile. La mise en œuvre de politiques publiques adaptées constitue ainsi certainement un élément déterminant du développement de l'agro-écologie dans le monde.

Références

Cockburn J., Coetzee H., Van den Berg J., Conlong D., 2014. Large-scale sugarcane farmers' knowledge and perceptions of *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae), push-pull and integrated pest management. *Crop Prot.*, 56, 1-9.

Conlong D.E., Rutherford R.S., 2009. Conventional and new biological and habitat interventions for integrated pest management systems: Review and case studies using *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). In : *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process* (R. Peshin, A.K. Dhawan, eds), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, 241-261.

DeClerck F.A., Chazdon R., Holl K.D., Milder J.C., Finegan B., Martinez-Salinas A., Imbach P., Canet L., Ramos Z., 2010. Biodiversity conservation in human-modified landscapes of Mesoamerica: Past, present and future. *Biol Conserv.*, 143, 2301-2313.

Damour G., Dorel M., Quoc H.T., Meynard C., Risède J.M., 2014. A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 52, 218-228, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.004> .

Damour G., Navas M.L., Garnier E., 2018. A revised trait-based framework for agroecosystems including decision rules. *J App Ecol*, 55, 12-24.

Deheuvels O., Avelino J., Somarriba Chavez E., Malézieux E., 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149 (1), 181-188.

Diack M., Sene M., Badiane A.N., Diatta M., Dick R.P., 2000. Decomposition of a native shrub, *Piliostigma reticulatum*, litter in soils of semiarid Senegal. *Arid Soil Res Rehab*, 14, 205-218.

Djigal D., Chabrier C., Duyck P.-F., Achard R., Quénéhervé P., Tixier P., 2012. Cover crops alter the soil nematode food web in banana agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 142-150.

Duyck P.F., Pavoine S., Tixier P., Chabrier C., Quénéhervé P., 2009. Host range as an axis of niche partitioning in the plant-feeding nematode community of banana agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 1139-1145.

Garrity D.P., Akinnifesi F.K., Ajayi O.C., Weldesemayat S.G., Mowo J.G., Kalinganire A., Larwanou M., Bayala J., 2010. Evergreen Agriculture: A robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Secur*, 2, 197-214.

Goebel F.R., Beuzelin J., Way M.J., 2018. Progress in understanding and managing insect pests affecting sugarcane. In : *Achieving Cultivation of Sugarcane* (P. Rott, ed.), vol. 2, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, Royaume-Uni.

Hergoualc'h K., Blanchard E., Skiba U., Henault C., Harmand J.M., 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agr Ecosyst Environ*, 148, 102-110.

Husson O., Séguy L., Charpentier H., Rakotondramanana, eds, 2013. *Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) : Application à Madagascar*, GSDM/Cirad, Antananarivo, Madagascar, 716 p.

Husson O., Tran Quoc H., Boulakia S., Chabanne A., Tivet F., Bouzinac S., Lienhard P., Michellon R., Chabierski S., Boyer J., Enjalric F., Rakotondramanana, Moussa N., Frédéric Jullien F., Balarabe O., Rattanatrasy B., Castella J.C., Charpentier H., Séguy L., 2015. Co-designing innovative cropping systems that match biophysical and socio-economic diversity: The DATE approach to Conservation Agriculture in Madagascar, Lao PDR and Cambodia. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 1-19, <https://doi.org/10.1017/S174217051500037X> .

Jagoret P., Kwasseu J., Messie C., Michel-Dounias I., Malézieux E., 2014. Farmers' assessment of the use of value of agrobiodiversity in complex cocoa agroforestry systems in central Cameroon. *AgroForestry Systems*, 88 (6), 983-1000.

Kizito F., Dragila M.I., Senè M., Brooks J.R., Meinzer F.C., Diedhiou I., Diouf M., Lufafa A., Dick R.P., Selker J., Cuenca R., 2012. Hydraulic redistribution by two semi-arid shrub species: Implications for Sahelian agro-ecosystems. *J Arid Environ*, 83, 69-77.

Le Bellec F., Rajaud A., Ozier Lafontaine H., Bockstaller C., Malézieux E., 2012. Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (3), 703-714, <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0070-9> .

Louppe D., 1991. *Guiera senegalensis* : espèce agroforestière ? *Bois et forêts des tropiques*, 228, 41-47.

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier Lafontaine H., Rapidel B., De Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (1) 43-62, <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2007057> .

Malézieux E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1), 15-29, <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z> .

Meylan L., 2012. Design of cropping systems combining production and ecosystem services: Developing a methodology combining numerical modeling and participation of farmers. *Fonctionnement des écosystèmes*

naturels et cultivés, thèse, Montpellier Supagro, Montpellier, 153 p.

Meylan L., Merot A., Gary C., Rapidel B., 2013. Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: The case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Agr Syst*, 118, 52-64.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, DC, États-Unis, 155 p.

Mollot G., Tixier P., Lescourret F., Quilici S., Duyck P.-F., 2012. New primary resource increases predation on a pest in a banana agroecosystem. *Agricultural and Forest Entomology*, 14 (3), 317-323.

Nibouche S., Tibère R., Costet L., 2012. The use of *Erianthus arundinaceus* as a trap crop for the stem borer *Chilo sacchariphagus* reduces yield losses in sugarcane crops: Preliminary results. *Crop Prot*, 42, 10-15.


Naudin K., Gozé E., Balarabe O., Giller K.E., Scopel E., 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multilocal on-farm assessment. *Soil and Tillage Research*, 108 (1-2), 68-76, [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.still.2010.03.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.03.002) ☐

.

Ranaivoson L., Naudin K., Ripoche A., Rabeharisoa L., Corbeels M., 2018. Is mulching an efficient way to control weeds? Effects of type and amount of crop residue in rainfed rice based cropping systems in Madagascar. *Field Crop Research*, 217, 20-31.

Rapidel B., Allinne C., Cerdán C., Meylan L., Virginio Filho E.D.M., Avelino J., 2015. Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. In : *Sistemas Agroforestales en el Neotrópico. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. (F. Montagnani, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, B. Eibl, eds), Catie-Serie Técnica, Turrialba, Costa Rica, 5-20.

Rapidel B., DeClerck F., Le Coq J.F., Beer J., eds, 2011. *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry: Measurement and payment*, Earthscan, Londres, Royaume-Uni, 433 p.

Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., Habib R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1), 273-303, <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4> .

Rothé M., Le Bellec F., Payet R-M., Bockstaller C., 2016. Impact of weeds management on the floristic composition and abundance of the cover in citrus orchards: A step to conservation biological control. 14th ESA Congress, 5-9 septembre 2016, Édimbourg, Écosse.

Roupsard O., Ferhi A., Granier A., Pallo F., Depommier D., Mallet B., Joly H.I., Dreyer E., 1999. Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. in an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. *Funct Ecol*, 13, 460-472.

Simon S., Lesueur-Jannoyer M., Plénet D., Lauri P.E., Le Bellec F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *European Journal of Agronomy*, 82, 320-330.

Tixier P., Lavigne C., Alvarez S., Gauquier A., Blanchard M., Ripoche A., Achard R., 2011. Model evaluation of cover crops, application to eleven species for banana cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 34, 53-61.

Weemstra M., Mommer L., Visser E.J.W., Van Ruijven J., Kuyper T.W., Mohren G.M.J., Sterck F.J., 2016. Towards a multidimensional root trait framework: A tree root review. *New Phytol*, 211, 1159-1169.

Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (4), 503-515.

Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets Ü., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C., Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R., 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821.